

引用格式: 李苏, 龙晓泳, 黄冉, 郝丁凡, 白莹. 热带高磁性花岗岩区土壤磁学的气候响应及古气候学意义[J]. 山地学报, 2025, 43(6): 836-850.
LI Su, LONG Xiaoyong, HUANG Ran, HAO Dingfan, BAI Ying. Climate response of soil magnetism in tropical high-magnetic granite area of China and its paleoclimatic significance [J]. Mountain Research, 2025, 43(6): 836-850.

热带高磁性花岗岩区土壤磁学的气候响应及古气候学意义

李苏, 龙晓泳*, 黄冉, 郝丁凡, 白莹

(西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要: 表生铁氧化物对区域气候和成壤环境的变化具有高度敏感性, 其磁学指标可用于土壤分类及古气候重建等领域。花岗岩中原生磁性矿物的风化蚀变可干扰土壤磁性的气候响应, 既有研究多聚焦于低磁性花岗岩地区, 对高磁性花岗岩区土壤磁性的气候响应研究较少。本文以海南吊罗山高磁性花岗岩残积土为研究对象, 运用土壤化学和磁学方法, 分析了不同山地气候(温度: 25.0 °C ~ 19.8 °C; 降雨量: 2012 ~ 3832 mm · a⁻¹) 条件下, 土壤铁氧化物相的转化过程及磁性颗粒的气候响应机制。研究发现: (1) 与低磁性花岗岩地区相比, 吊罗山花岗岩残积土磁性随气候变化同样存在阈值效应; (2) 吊罗山中部气候适中地区(21.4 °C, 3278 mm) 磁性矿物最为富集, 磁性颗粒以原生单畴和多畴颗粒为主, 并随剖面深度增加而增强; (3) 吊罗山顶部和底部地区磁性明显降低, 前者与山顶降水增加导致的化学风化增强及铁氧化物的快速水化有关, 后者与山底温度增加, 导致化学风化增强及原生粗颗粒磁性矿物的快速氧化有关。该研究对理解高磁性母质的土壤发生过程, 评估沉积物中的碎屑磁性矿物的破坏对气候重建的影响有重要意义。

关键词: 花岗岩; 铁氧化物; 磁性矿物; 热带

中图分类号: P318

文献标志码: A

表生铁氧化物是原生含铁硅酸岩矿物化学风化的终极产物, 对区域气候和成壤环境的变化具有高度敏感性^[1]。地球表生环境中的铁氧化物包括晶质和非晶质两大组分, 其中晶质矿物通常占主导地位。按照光学及磁学性质的差异, 晶质铁氧化物可划分致色组分与致磁组分。致色组分包括红色的赤铁矿 (Hematite, Hm, α -Fe₂O₃) 和黄色的针铁矿 (Goethite, Gt, α -FeOOH); 致磁组分包括磁赤铁矿 (Maghemite, Mgh, γ -Fe₂O₃) 和磁铁矿 (Magnetite, Mgt, Fe₃O₄)^[2-3]。传统上, 铁氧化物的定量分析主要基于地球化学与土壤化学方法^[4-5]。近年来, 随着光谱学^[6-7]和环境磁学技术^[8]的发展, 铁氧化物

相关光学指标和磁学指标在土壤分类^[9]、古气候重建^[10-14], 以及水土保持和生态恢复评价^[15-16]中得到了广泛应用。

中国土壤磁学的气候响应研究多聚焦于水热同步变化的季风区。在温带季风区, 降水是主导化学风化的关键因子, 化学风化强度、铁氧化物含量与土壤磁性通常随降水增加同步增长^[17-20]。然而, 在热带亚热带季风区, 由于过高的温度或者降水, 磁性矿物可能会向其他铁氧化物转化, 导致土壤磁性呈现非线性气候响应特征^[12,14]。

与此同时, 成土母质中的原生铁氧化物可能干扰成壤铁氧化物的富集过程, 最终影响剖面尺度和

收稿日期 (Received date): 2025-02-24; 改回日期 (Accepted date): 2025-12-29

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41877369)。[National Natural Science Foundation of China (41877369)]

作者简介 (Biography): 李苏 (2000-), 女, 河南濮阳, 硕士研究生, 主要研究方向: 铁氧化物与环境磁学。[LI Su (2000-), female, born in Puyang, Henan Province, M. Sc. candidate, research on iron oxides and environmental magnetism] E-mail: ls01271s@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 龙晓泳 (1979-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 行星表面铁氧化物的高光谱与环境磁学。[LONG Xiaoyong (1979-), male, Ph. D., professor, research on hyperspectral and environmental magnetism of iron oxides on planetary surfaces] E-mail: longxy@126.com

区域尺度土壤颜色及磁性对气候的响应模式。研究发现,在中国西北半旱区及青藏高原,风沙土的风化作用较弱,其铁氧化物及磁性颗粒适合作为源区示踪指标^[13,21-22];在半干旱的风尘沉积中,碎屑铁氧化物对黄土古土壤的磁性变化存在显著干扰^[14,23];南方火成岩残积母质中的原生铁氧化物也可能影响上覆富铁土与铁铝土的磁性演化^[24-26]。

花岗岩是地壳的代表性母岩,抗风化能力强,易形成高大山体,广泛分布于中国福建、云南及海南等地。受岩浆类型及分异过程差异的控制^[27],花岗岩常伴生不同含量和形态的磁铁矿,这些磁性矿物的风化蚀变对剖面尺度^[26,28]、区域尺度^[29]和流域尺度^[30]的土壤磁学气候响应具有重要影响。此外,在高原山地,随海拔上升,降水与温度常呈现反向变化,驱使赤铁矿与针铁矿发生显著的海拔分异,进而调控土壤磁性的气候响应。目前相关研究多聚焦于低磁性花岗岩地区^[12,25],对高磁性花岗岩区土壤磁性的气候响应研究较少。

海南万泉河流域是中国热带典型的花岗岩流

域^[29],其中吊罗山地区属于高磁性花岗岩区,下游瀉湖地区存在大量含钛磁铁矿沉积^[31]。本研究基于吊罗山花岗岩山区的土壤磁性调查,选取不同海拔的5个典型剖面,开展花岗岩的风化过程及土壤磁学研究,探究区域尺度和剖面尺度的土壤磁性响应规律,以期为高磁性母质的土壤分类及沉积物气候重建提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

海南岛热带雨林吊罗山国家公园位于中国热带海南岛的东南部(109°40'~110°04'E, 18°38'~18°51'N)(图1a)。该区下覆中生代黑云母花岗岩,岩石类型为角闪黑云母二长花岗岩、黑云母正长花岗岩,结构为中粗粒巨斑状,主要矿物为石英、斜长石和黑云母等,副矿物有磷灰石和磁铁矿等^[31-32]。

吊罗山区为热带季风气候,降雨集中在5—10月台风季,相对湿度为86%,年均气温为24℃,年均

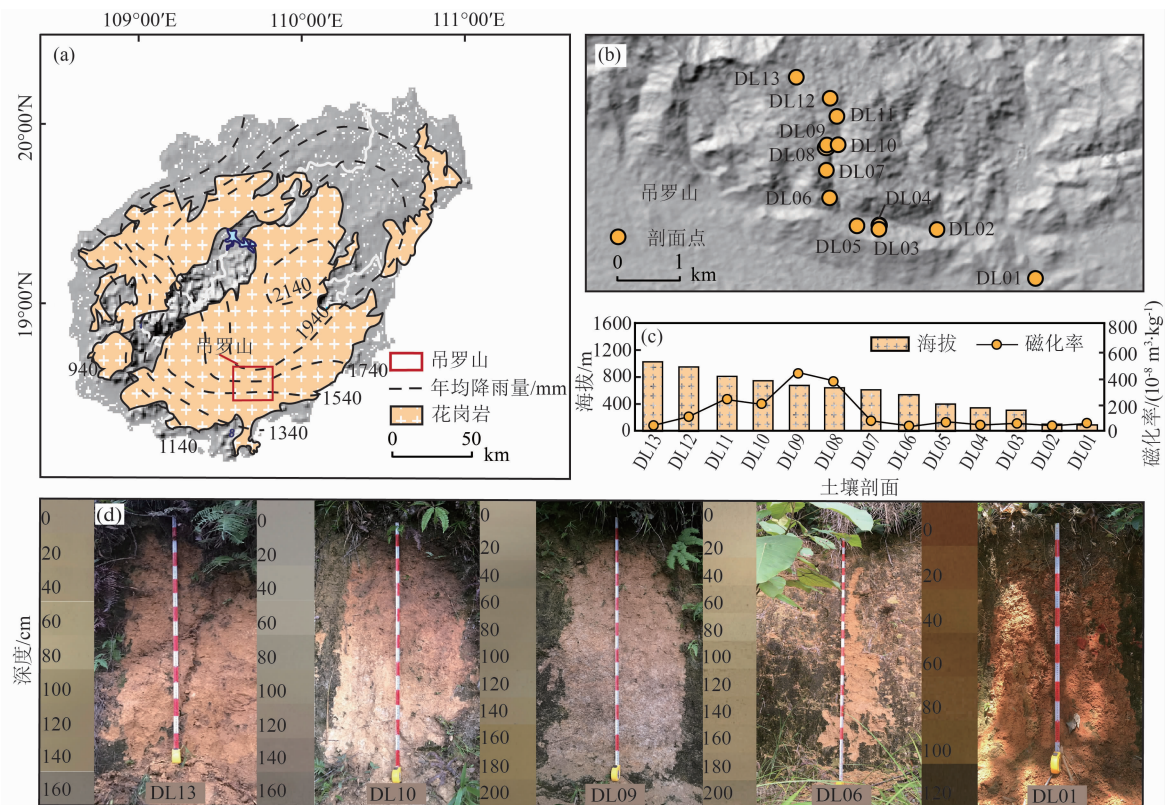


图1 吊罗山采样点分布和剖面特征:(a)吊罗山地理位置示意图;(b)采样剖面点分布;

(c)剖面海拔和剖面平均磁化率强度;(d)采样剖面(DL01~DL13)照片和对应标有采样深度的光谱图片

Fig. 1 Distribution and profile characteristics of sampling points in the Diaoluo Mountain;

(a) geographical location of the Diaoluo Mountain Area; (b) distribution of sampling profile points; (c) elevation and average magnetic susceptibility of sampling profiles; (d) photos of sampling profiles (DL01 – DL13) and corresponding spectral images marked with sampling depths

降雨量为 2160 mm^[33-34]。吊罗山海拔 100 ~ 1499 m, 垂直地带性明显, 不同海拔气候数据由邻近气象站点 (琼中、陵水、保亭和琼海) 数据插值得到^[33,35]。吊罗山 600 m 以下地区坡度约 18°, 主要分布半落叶季雨林和常绿季雨林, 土壤类型为砖红壤, 系统分类为湿润富铁土; 海拔 600 ~ 1200 m 的地区, 坡度约 50°, 主要分布沟谷雨林与热带山地雨林, 土壤类型为黄色砖红壤, 系统分类为常湿富铁土; 海拔 1200 m 以上地区坡度约 65°, 主要分布苔藓矮林及灌丛, 土壤类型为山地草甸土, 系统分类为铝质常湿锥形土^[36-37]。

本研究前期共采集吊罗山 (DL) 不同海拔 (66 ~ 927 m) 的土壤残积剖面 13 个, 随海拔增加编号为 DL01 ~ DL13 (图 1b)。样品初测发现, 土壤剖面的平均磁性在中部海拔地区 (500 ~ 700 m) 最高, 山底和山顶区域磁性快速下降 (图 1c)。土壤颜色从山底 (5YR 5/8) 到山顶 (10YR 8/6) 发生了明显的黄化过程。本研究选择不同海拔的 5 个典型风化剖面 DL01、DL06、DL09、DL10 和 DL13 开展系统研究 (图 1d)。该系列剖面植被覆盖良好, 人为干扰小, 为保证样品深度上的可比性, 样品从表土采集至风化壳底部, 间距为 20 cm, 覆盖主要土壤发生层 (表 1)。

1.2 土壤化学分析

土壤样品风干后过 2 mm 筛备用。土壤颜色采用孟塞尔颜色系统比色卡 (Munsell Color System) 测

定, pH 通过水土比 2.5:1 的土壤溶液测定^[5]。土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 含量通过 Vario Macro Cube (Elementar Corporation) 分析仪测定。机械组成采用激光粒度仪 Mastersizer 2000 测定, 粒级划分采用国际制 (黏粒粒径小于 0.002 mm, 粉粒粒径为 0.002 ~ 0.02 mm, 砂粒粒径为 0.02 ~ 2 mm)。土壤矿物通过 D8 ADVANCE 衍射仪完成, 测试过程采用铜 (Cu) 靶, 扫描范围为 5° ~ 70° (2 θ), 步长 0.02°, 仪器电压为 40 kV, 电流为 40 mA。化学元素通过 PANalytical-PW2424 X 射线荧光光谱仪 (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF) 压片法测定, 元素含量以氧化物形式表示。化学风化指数 (Chemical Index of Alteration, CIA)^[38] 由式 (1) 计算得到, 硅铝率 (Silica-Alumina ratio, Sa) 由式 (2) 计算得到。

$$C = n_1 / (n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times 100 \quad (1)$$

$$S = n_5 / n_1 \quad (2)$$

式中, C 为化学风化指数; S 为硅铝率; n_1 为 Al_2O_3 的摩尔含量; n_2 为 CaO 的摩尔含量; n_3 为 Na_2O 的摩尔含量; n_4 为 K_2O 的摩尔含量; n_5 为 SiO_2 的摩尔含量。

1.3 土壤铁氧化物

游离铁 (Fe_d) 采用至少两轮的柠檬酸盐-碳酸氢盐-连二硫酸盐法^[4] (Dithionate-Citrate-Bicarbonate, DCB) 提取。结晶程度较差的无定形铁 (Fe_o) 使用草

表 1 吊罗山土壤基本理化性质
Tab. 1 Basic physical and pedochemical properties of soil in the Diaoluo Mountain

剖面	经纬度	海拔/ m	年均降雨量/ (mm · a ⁻¹)	年均温/ °C	层位	深度/cm	样品数/ 个	酸碱度*	有机碳含量* / (g · kg ⁻¹)	黏粒 含量* / %	粉粒 含量* / %	砂粒 含量* / %
DL01	18°38'N 109°57'E	66	2012	25.00	A	0 ~ 20	1	5.85	28.76	6.21	76.87	16.91
					B	20 ~ 80	4	4.77	7.20	21.55	45.84	32.61
					C	100 ~ 120	2	4.88	4.92	15.17	50.27	34.55
DL06	18°40'N 109°52'E	539	3012	22.10	A	0 ~ 20	2	4.83	5.01	7.11	76.98	15.91
					B	40 ~ 140	6	4.79	2.32	20.90	42.43	36.77
					C	160 ~ 200	3	4.77	1.64	17.52	47.62	34.86
DL09	18°41'N 109°52'E	665	3278	21.40	A	0 ~ 20	2	4.38	10.06	11.39	62.07	26.54
					B	40 ~ 140	6	4.79	3.39	12.06	60.91	27.03
					C	160 ~ 200	3	5.27	1.22	3.81	84.87	11.88
DL10	18°41'N 109°52'E	700	3352	21.20	A	0 ~ 20	2	4.65	18.49	8.96	51.18	39.87
					B	40 ~ 100	4	4.59	5.38	11.75	52.85	35.39
					C	140 ~ 160	3	4.68	1.60	7.93	46.41	45.66
DL13	18°43'N 109°52'E	927	3832	19.80	A	0 ~ 20	2	4.44	9.47	9.21	45.71	45.09
					B	40 ~ 80	3	4.71	2.68	11.63	44.02	44.36
					C	100 ~ 160	4	4.86	1.83	12.47	39.99	47.54

注: * 代表发生层平均值。

酸铵 (Ammonium-Oxalate, OX) 溶液提取^[1-2]。Fe_d 和 Fe_o 含量均采用 Thermo ICAP7400DV 电感耦合等离子体发射光谱仪测定。结晶态铁 (Fe_c) 通过 Fe_d-Fe_o 计算得到。

土壤样品通过纯净水分散后均匀涂抹至 25 mm × 75 mm 玻片上, 风干后使用 Perkin-Elmer Lambda 900 分光光度计以 2 nm 的间隔, 采集 400 ~ 700 nm 可见光波段的土壤漫反射光谱; 红度指数 (Redness) 通过样品在 630 ~ 700 nm 红光波段与可见光波段平均反射率的比值计算得出^[39], 通过不同含量标准赤铁矿与去游离铁土壤基底的混合样品序列建立估算方程^[28,40]。标准矿物为纳米级粒径赤铁矿 Pfizer R1599 红, 赤铁矿含量 (g · kg⁻¹) 估算方程为:

$$H = 8 \times 10^{-5} \times e^{(28.277 \times R)} \quad (3)$$

式中, H 为赤铁矿含量; e 为自然常数; R 为红度指数。

天然土壤样品中, 赤铁矿和针铁矿会以一定比例混合, 但赤铁矿致色效应远高于针铁矿, 需要通过游离铁、赤铁矿和无定形组分间接推算针铁矿的含量^[28]。具体计算公式为:

$$G = 1.59 \times (F_d - F_o - H/1.43) \quad (4)$$

式中, G 为针铁矿含量; F_d 为游离铁含量; F_o 为无定形铁含量。

1.4 环境磁学分析

磁化率 (Magnetic Susceptibility, χ), 采用磁化率仪 Bartington MS2B 分别在 0.47 kHz 和 4.7 kHz 下测定低频磁化率 (χ_{lf}) 和高频磁化率 (χ_{hf})。代表超顺磁颗粒 (Superparamagnetic Particles, SP, 粒径小于 20 ~ 25 nm) 的绝对贡献和相对贡献的频率磁化率 χ_{fd} 和 $\chi_{fd}\%$ ^[40-44] 分别计算如下 (式 5 和式 6):

$$\chi_{fd} = \chi_{lf} - \chi_{hf} \quad (5)$$

$$\chi_{fd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100\% \quad (6)$$

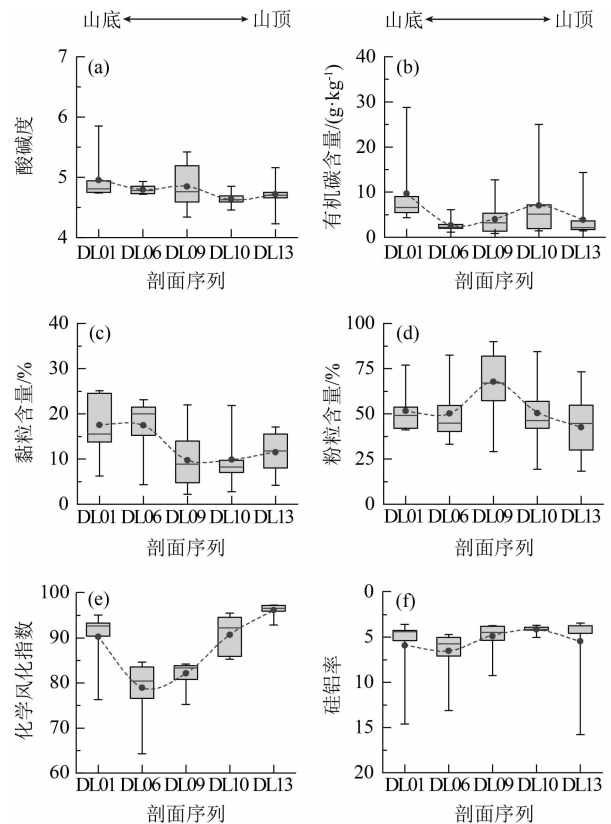
非磁滞剩磁 (Anhysteris Remanent Magnetization, ARM) 通过 Molspin 交变退磁仪及其 ARM 附件获得, 其中直流场场强 50 μ T, 交变磁场最大场强为 1 T。非磁滞剩磁磁化率 χ_{ARM} 通过直流场标准化得到, 常用于估算单畴磁性颗粒 (Single Domain, SD, 粒径小于 0.05 μ m) 的含量。饱和等温剩磁 (Saturated Isothermal Remanent Magnetization, SIRM) 通过 ASC-10 脉冲磁力仪在 1T 的外场下获得, 多用于反映多畴亚铁磁性颗粒 (Multi Domain, MD, 粒径约为 1 ~ 2 μ m) 的含量^[43]。所有剩磁均在 AGICO JR6 旋

转磁力仪中测量。一阶反转曲线 (First-Order Reversal Curves, FORCs) 使用 Micromag VSM 3900 磁强计进行测量, 通过 FORCinel 软件进行可视化, 其中 B_c 为矫顽力, B_u 表示畴壁或粒子相互作用, ρ 代表一阶反转曲线分布密度^[45]。温度磁化率 (χ -T) 曲线通过 MFK1-FA 卡帕桥装置在氩气环境中, 从室温逐渐加热至 700 °C 后再逐渐冷却获得。

2 结果

2.1 成壤环境

由表 1、图 2 和图 3 可知, 从 DL01 至 DL13, 海拔由 66 m 逐渐升高至 927 m, 温度由 25.0 °C 降低至 19.8 °C, 降雨量由 2012 mm · a⁻¹ 增加到 3832 mm · a⁻¹ (表 1)。随着海拔升高, pH 值略微降低, 为 4.23 ~ 5.85, 属于强酸性土壤 (图 2a)。剖面尺度上, 山底



说明: 虚线为平均值变化趋势线。

图 2 吊罗山土壤剖面理化参数:

- (a) 酸碱性; (b) 有机碳含量; (c) 黏粒含量;
(d) 粉粒含量; (e) 化学风化指数; (f) 硅铝率

Fig. 2 Basic physical and pedochemical parameters of soil profiles in the Diaoluo Mountain; (a) pH; (b) SOC content; (c) clay content; (d) silt content; (e) CIA; (f) Sa

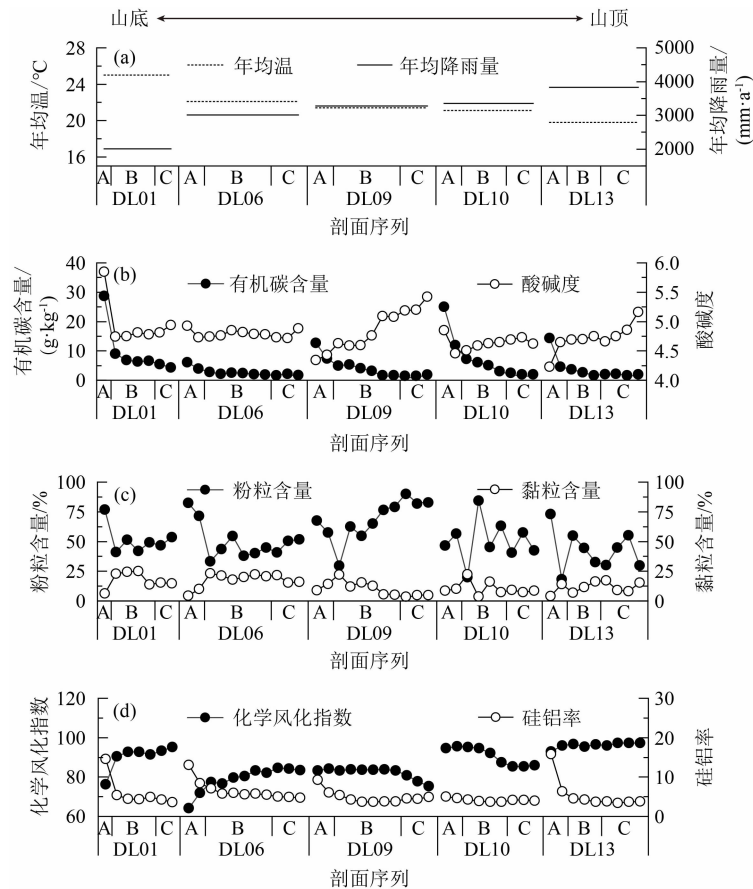


图3 吊罗山气候与土壤剖面理化参数:

(a) 年平均温度和年平均降雨量;(b) 有机碳含量和酸碱度;(c) 粉粒含量和黏粒含量;(d) 化学风化指数和硅铝率

Fig.3 Climate, basic physical and pedochemical parameters of soil profiles in the Diaolu Mountain:(a) mean annual temperature (MAT) and mean annual precipitation (MAP); (b) SOC content and pH; (c) clay content and silt content; (d) CIA and Sa

剖面表土层 pH 较高,山顶剖面表土 pH 较低(图 3b)。SOC 随海拔上升变化不明显,含量为 $0.83 \sim 28.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2b),SOC 在剖面尺度上呈现表土富集特点(图 3b)。土壤机械组成以砂粒与粉粒为主,最高可达 67.53% 和 89.93%;黏粒相对较少,范围为 2.18% ~ 25.14%(图 2c、图 2d)。随海拔增高,粉粒减少,黏粒增加且普遍在剖面中部(B 层)富集(图 3c)。

2.2 化学风化

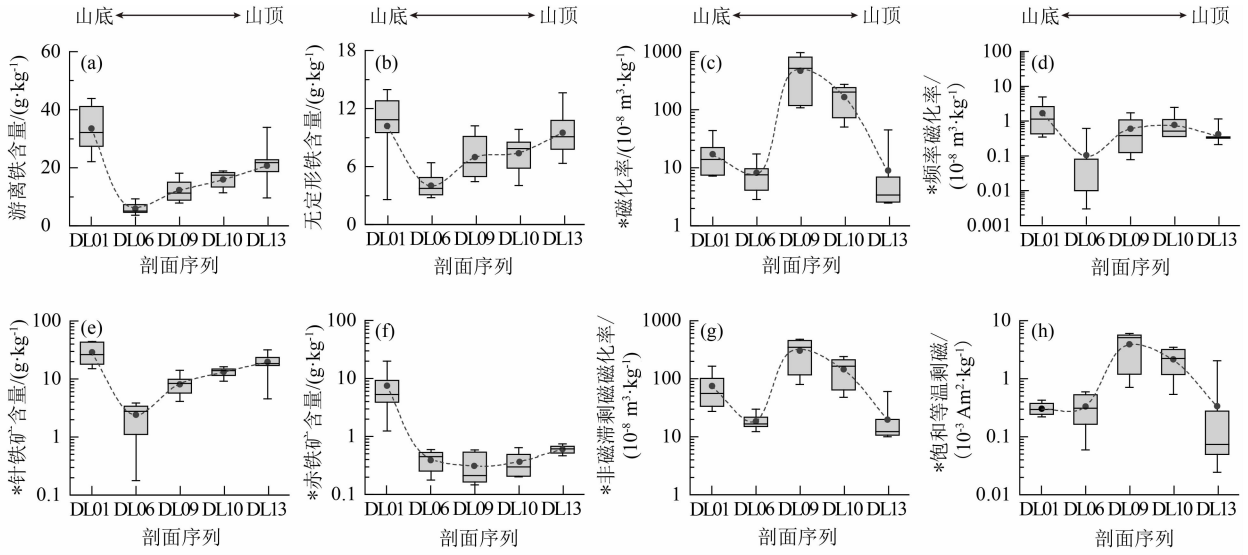
随海拔上升,CIA 和 Sa 存在阈值效应,转换点在 DL06(图 2e、图 2f)。剖面平均 CIA 值由 90.28(DL01)降至 78.93(DL06)后上升至 96.14(DL13)(图 2e),而剖面平均的 Sa 值由 5.93(DL01)上升到 6.53(DL06)后下降至 5.47(DL13)(图 2f)。剖面尺度上,CIA 的最高值从山底剖面 C 层转向山顶剖面的 A 层(图 3d),Sa 值则普遍在 A 层较高(图 3d)。

2.3 铁氧化物

随海拔的升高,土壤剖面平均 Fe_d 含量从 $33.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DL01)下降至 $5.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DL06)后又上升至(DL13) $20.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,阈值也出现在 DL06 附近(图 4a、图 5a)。 Fe_o 含量($4.11 \sim 10.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Gt 含量($2.27 \sim 28.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 Hm 含量($0.30 \sim 6.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)均呈现与 Fe_d 相似的变化规律(图 4b、4e 和 4f)。剖面尺度上,山底(DL01)和山顶(DL13)铁氧化物剖面分异不明显,而中部剖面(DL06 ~ DL09)的铁氧化物则普遍富集于 A 层(图 5a、图 5b)。

2.4 磁性矿物

随海拔升高,剖面平均 χ_{lf} 从 $17.15 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (DL01)升高至 $469.09 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (DL09),后降低至 $8.94 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (DL13)(图 4c),阈值出现在 DL09 附近。表征不同磁性颗粒的 χ_{fd} ($0 \sim 4.98 \times$



说明：* 代表纵轴数据使用 \log_{10} 变换得到；虚线为平均值变化趋势线。

图4 吊罗山土壤剖面铁氧化物含量和磁学参数值：(a) 游离铁含量；(b) 无定形铁含量；(c) 磁化率；(d) 频率磁化率；(e) 针铁矿含量；(f) 赤铁矿含量；(g) 非磁滞剩磁磁化率；(h) 饱和等温剩磁
 Fig. 4 Iron oxides content and magnetic proxies' values of soil profiles in the Diaoluo Mountain:
 (a) Fe_d content; (b) Fe_o content; (c) χ_{lr} ; (d) χ_{fd} ; (e) Gt content; (f) Hm content; (g) χ_{ARM} ; (h) SIRM

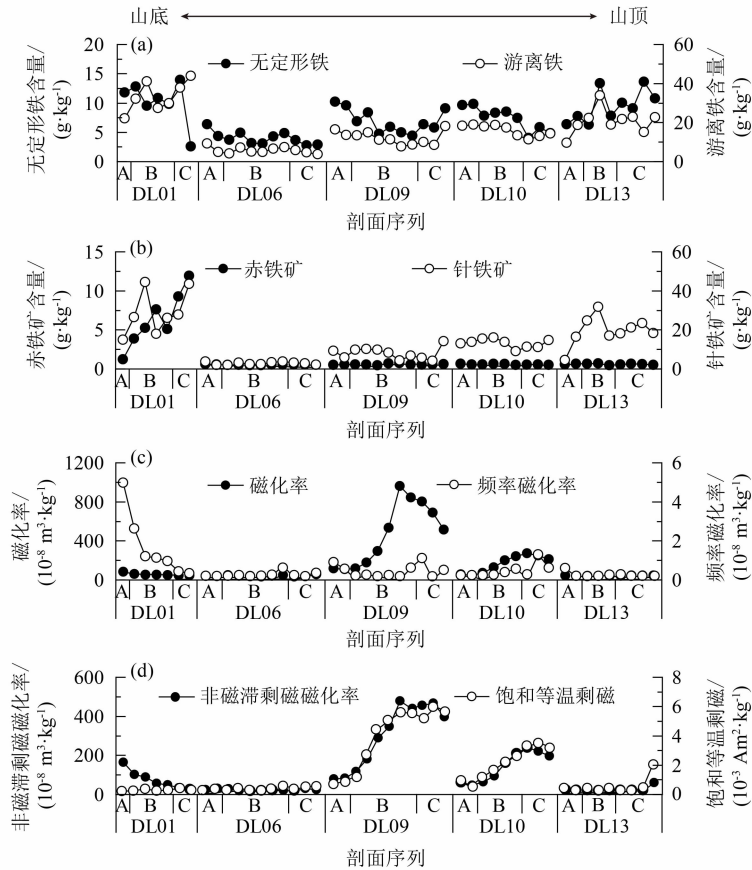


图5 吊罗山土壤剖面铁氧化物含量及磁学参数值：
 (a) 无定形铁含量和游离铁含量；(b) 赤铁矿含量和针铁矿含量；(c) 磁化率和频率磁化率；(d) 非磁滞剩磁磁化率和饱和等温剩磁
 Fig. 5 Iron oxides content and magnetic proxies' values of soil profiles in the Diaoluo Mountain:
 (a) Fe_o content and Fe_d content; (b) Hm content and Gt content; (c) χ_{lr} and χ_{fd} ; (d) χ_{ARM} and SIRM

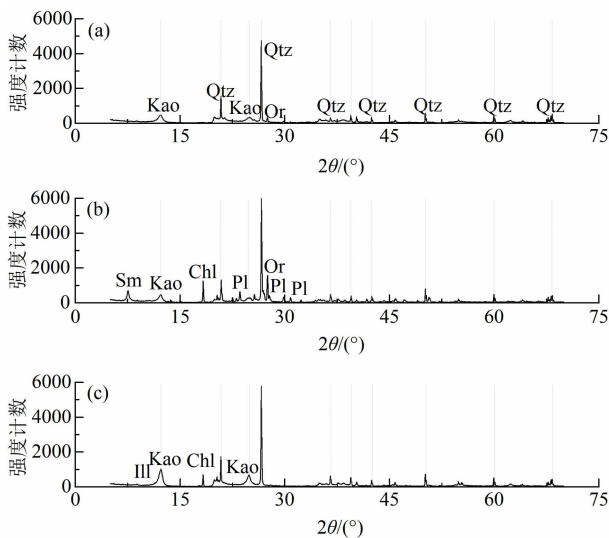
$10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)、 χ_{ARM} ($10.0 \sim 478.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 SIRM ($0.02 \sim 5.99 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) 均呈现与 χ_{Ir} 相似的变化规律 (图 4d、4g 和 4h)。剖面尺度上, 所有磁性参数普遍在剖面 C 层最高, 仅 χ_{d} 和 χ_{ARM} 在 DL01 的 A 层最高 (图 5c、图 5d)。

3 讨论

3.1 吊罗山花岗岩土壤化学风化的多尺度响应

从吊罗山不同高度的花岗岩母质的矿物组成来看 (图 6), 该区土壤原生矿物以石英、正长石、斜长石为主, 相对均一, 与区域地质背景相符^[31-32]。山体中部剖面风化程度弱, 含斜长石较多, 次生矿物以 2:1 的蒙脱石为主, 但在山顶和山底剖面中, 斜长石已风化殆尽, 次生矿物以 1:1 的高岭石为主。吊罗山区的 CIA 变化范围为 64.25 ~ 97.27 (图 3d), 处于中度风化到极端风化阶段^[38,46], 指示了强烈的脱盐基过程。Sa 变化范围为 3.45 ~ 15.77, 指示了该区强烈的脱硅过程 (图 3d)。

区域尺度上, Sa 基本呈现出与 CIA 的反相关, 说明该区脱盐基过程与脱硅富铝过程同步, 以长石



说明: θ 为衍射角; Kao 为高岭石; Qtz 为石英; Or 为正长石; Sm 为蒙脱石; Chl 为绿泥石; Pl 为斜长石; Ill 为伊利石。

图 6 吊罗山土壤样品矿物组成:

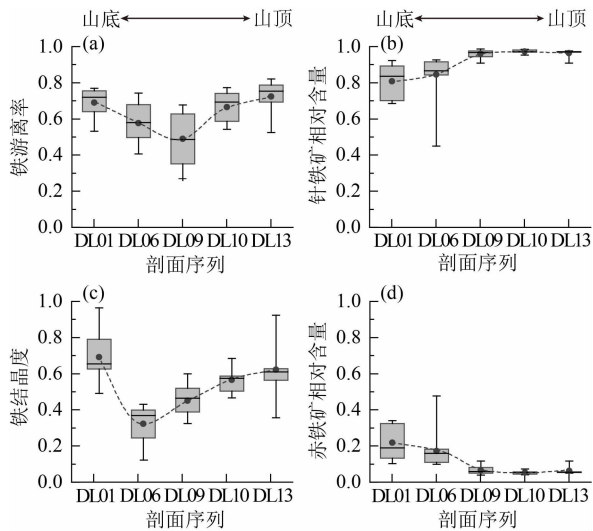
(a) 山顶土壤剖面 (DL13-C) 层矿物; (b) 山中土壤剖面 (DL09) C 层矿物; (c) 山底土壤剖面 (DL01) C 层矿物

Fig. 6 Mineral compositions of soil samples in the Diaolu Mountain: (a) mountain-summit soil profile (DL13-C); (b) mid-elevation zone soil profile (DL09-C); (c) mountain-base soil profile (DL01-C)

为代表的原生铝硅酸盐矿物的风化主导了化学风化过程^[46]。CIA 在吊罗山中部 DL06 (539 m) 处达到最低值 64.25 (图 3d), 说明该处化学风化强度最弱。DL06 以下随着海拔降低, 化学风化强度增加, 可能与山底温度增加化学风化速率有关^[47-48], 而 DL06 以上随海拔上升, 化学风化强度也增加, 可能与山顶更多降水促使有效淋溶过程有关^[48] (图 2e)。剖面尺度上, 山顶剖面的 A 层 CIA 较高, 而山底剖面 C 层 CIA 较高 (图 3d), 与黏粒变化趋势一致, 可能与山底剖面底部与地下水接触时间长促进化学风化有关。此外, 吊罗山剖面 A 层的 Sa 普遍升高 (图 3d), 可能与抗风化的石英颗粒相对富集以及富铝黏土的流失有关, 这与中国东南花岗岩地区的表土沙化现象基本一致^[26,49]。

3.2 吊罗山花岗岩土壤铁氧化物富集过程的多尺度响应

铁氧化物的风化富集过程包括游离过程、结晶过程以及分配过程。其中游离过程与化学风化强度有关, 通常随温度和降水的增加而增加, 前者可增加化学风化反应速率, 后者则可增加水岩反应时间及有效移除反应产物^[48,50-51], 常用 Fe_d/Fe_t 表征^[52]。结晶过程与风化强度、有机质含量等有关, 高风化强度有利于铁氧化物的富集和结晶, 而有机质的富集则可能限制铁氧化物的结晶, 可用 Fe_c/Fe_d 表征^[2]。此外, Hm 常形成相对干热的环境, Gt 则形成相对冷湿的环境, 两者的分配过程常用赤铁矿相对含量 $\text{Hm}/(\text{Hm} + \text{Gt})$ 和针铁矿相对含量 $\text{Gt}/(\text{Hm} + \text{Gt})$ 表征^[12]。图 7 和图 8 通过游离率 Fe_d/Fe_t 、结晶度 Fe_c/Fe_d 、 $\text{Hm}/(\text{Hm} + \text{Gt})$ 和 $\text{Gt}/(\text{Hm} + \text{Gt})$, 跟踪不同过程的水热响应形式。 Fe_d/Fe_t 表征的铁游离率在 DL09 出现最低值 (图 7a), 该阈值转换点的海拔高于 CIA 与 Sa 等化学风化指数发生转变的位置 (DL06) (图 2e、图 2f)。从 DL06 到 DL09 剖面, 温度降低而降水增加时, 化学风化强度增加, 但铁氧化物游离率仍在降低。理论上, 花岗岩中 CIA、Sa 的指数变化多以长英质矿物的风化占据主导^[46,53], Fe_d/Fe_t 则侧重衡量铁镁质矿物的风化过程^[52], 铁镁质矿物相对长英质矿物更易风化, 所以当温度降低时, 铁的游离率可能更易受到低温限制^[54-55]。与此同时, 随着海拔升高, 相对冷湿环境中适宜针铁矿及三水铝石的形成, 可能导致游离铁氧化物出现更高的铝替代率^[56], 进而间接抑制铁的游离。剖面尺



说明:虚线为剖面平均含量变化趋势线。

图7 吊罗山土壤剖面铁氧化物比值:(a) 铁游离率;

(b) 针铁矿相对含量;(c) 铁结晶度;(d) 赤铁矿相对含量

Fig. 7 Ratio of iron oxides of soil profiles in the Diaolu Mountain;

(a) Fe_d/Fe_t ; (b) $Gt/(Hm + Gt)$; (c) Fe_c/Fe_d ; (d) $Hm/(Hm + Gt)$

度上,铁游离率通常在 A 层达到最高,但在山地剖面 C 层也较高,可能与山底剖面的地下水作用有关(图 8b)。

Fe_c/Fe_d 表征的铁氧化物结晶度在 DL06 出现最低值,对应于化学风化指数表征的最低风化强度位置(图 7c)。说明化学风化程度越低,铁氧化物中结晶度越低。这与风化早期相对较高的无定形 Si 的释放抑制铁氧化物的结晶有关^[52-53]。剖面尺度上,剖面 C 层出现铁结晶度的高值,同时剖面顶部

铁游离率也普遍回升,这与有机质富集限制铁氧化物的结晶有关^[57](图 8)。

$Hm/(Hm + Gt)$ 表征赤铁矿的相对含量在 DL01 处达到最高(图 7d),随着海拔上升,剖面均值呈现从 0.19 降至 0.04 的变化趋势,说明水热的反向变化会增强赤铁矿与针铁矿竞争性分配过程^[57-58]。随海拔升高气候趋于相对冷湿时,更适合 Gt 的形成,而抑制 Hm 的形成。这与在海南大范围的低磁性花岗岩表土研究结果基本一致^[12],说明 $Hm/(Hm + Gt)$ 可有效指示气候的干湿变化,同时屏蔽花岗岩岩性差异及风化强度的影响,这也为 $Hm/(Hm + Gt)$ 广泛运用于气候重建中奠定了基础。与此同时,剖面尺度上, $Hm/(Hm + Gt)$ 也倾向于在透水性好的土壤 B 层富集,同时在山底剖面的 C 层也出现了 $Hm/(Hm + Gt)$ 的高值,这一般与地下水作用导致的氧化还原现象催化了 Hm 的形成有关^[26,59],与中国南方红土的下部网纹以及水稻土下部的鳝血斑的形成机制类似^[60-61]。

3.3 吊罗山花岗岩区土壤磁性矿物分配的水热响应机制

传统基于温带地区的土壤磁学研究认为,含铁硅酸岩风化水解形成的铁氧化物,在适当有机质或生物还原条件下,可转化成 SP 等细颗粒的磁铁矿^[62],进而推动土壤磁性向剖面上部增强。热带亚热带地区,即使是氧化条件下,土壤中无定形铁向 Hm 的老化可伴生 SP 到 SD 颗粒的磁赤铁矿的形成,该模式解释了中国南方热带红色富铁土及铁铝

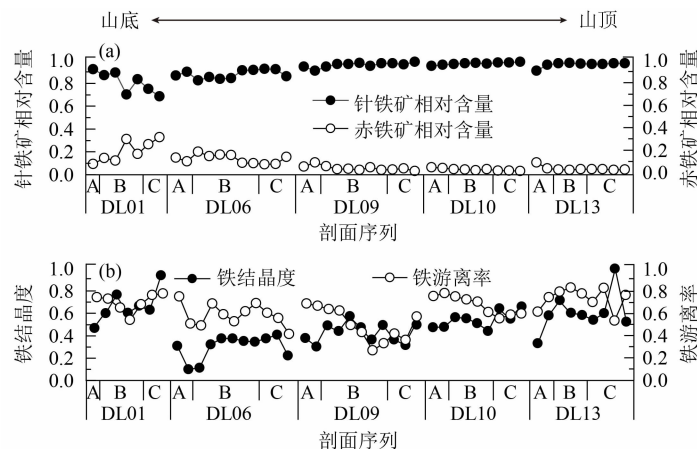


图8 吊罗山土壤剖面铁氧化物比值:

(a) 针铁矿相对含量和赤铁矿相对含量;(b) 铁结晶度和铁游离率

Fig. 8 Ratio of iron oxides of soil profiles in the Diaolu Mountain;

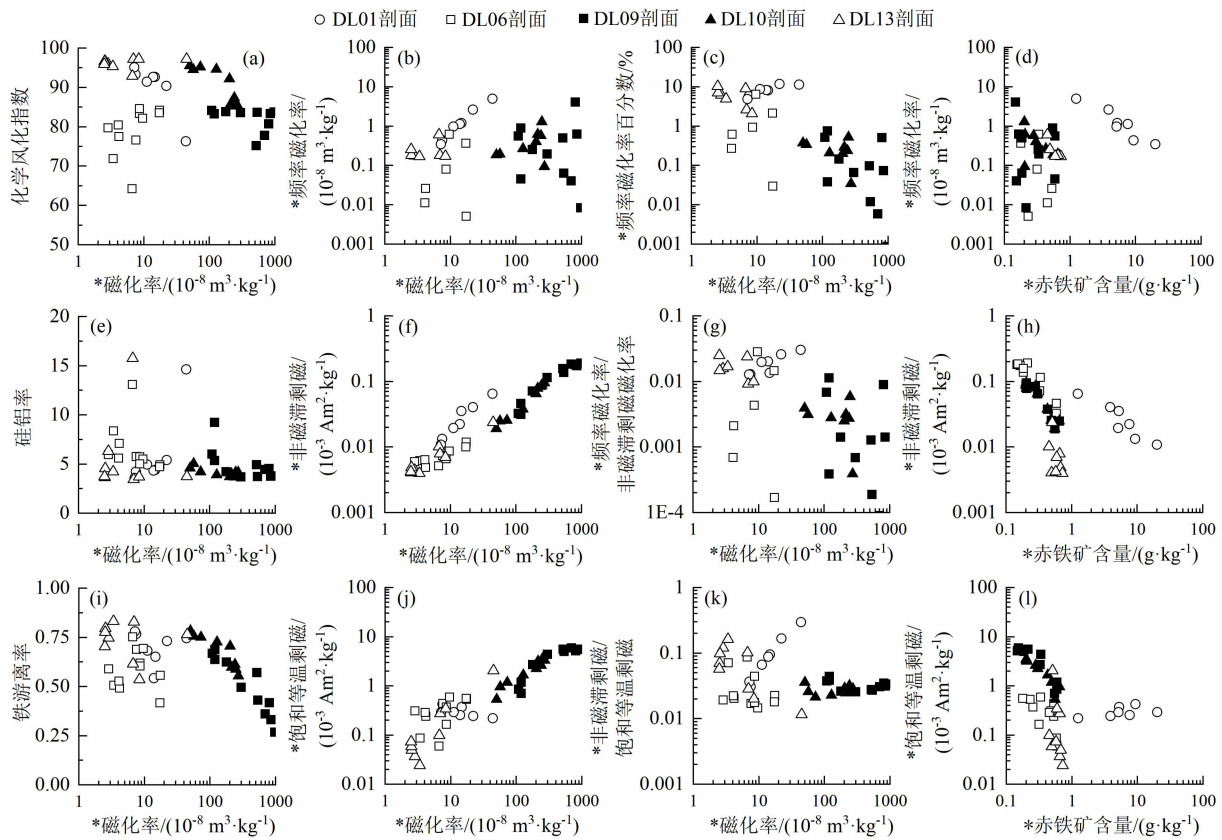
(a) $Gt/(Hm + Gt)$ and $Hm/(Hm + Gt)$; (b) Fe_c/Fe_d and Fe_d/Fe_t

土的高磁性现象^[63-65]。然而,气候相对干热时,磁赤铁矿颗粒增长到一定程度(粒径大小为 20~25 nm),其热力学稳定性降低,可能转化为低磁性的赤铁矿^[63],这解释了红层上覆土壤的低磁性现象^[26]。与此同时,气候相对冷湿时,铁氧化物则会水化成铁的氢氧化物,形成低磁性的黄色针铁矿,这解释了富铁土和铁铝土中相对冷湿的黄色土壤亚类出现的普遍低磁性现象^[65]。

吊罗山地区基岩为粗颗粒黑云母花岗岩,伴生磁铁矿,结晶好,肉眼可见的最大晶粒可达 1 mm^[31-32],未风化原岩磁化率可超过 $1000 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。该区土壤磁性在 DL09 剖面下层达到最高值,与 Fe_d/Fe_t 指示的最低铁游离程度一致(图 7a),同时 χ_{lf} , ARM 和 SIRM 等磁性参数出现了

普遍向上减弱现象,与传统土壤磁性的向上富集相反^[40](图 5c、图 5d)。从磁性矿物组成来看,吊罗山地区 χ_{lf} 增长与 ARM 和 SIRM 的相关性明显高于 χ_{fd} (图 9b、9f 和 9j),说明该区土壤磁性的主要贡献为单畴及多畴颗粒,而超顺磁颗粒积累不明显。随着 χ_{lf} 的增长,表征细颗粒磁性矿物相对含量的 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{fd}/χ_{ARM} 和 ARM/SIRM 均出现快速下降(图 9c、9g 和 9k),表明磁性颗粒快速变粗。此外,在山底 Hm 相对富集的区域, χ_{fd} 与 χ_{ARM} 指示的 SP 颗粒和 SD 颗粒也呈现出表土富集现象(图 5c、图 5d)。

吊罗山不同高度的 3 个典型土壤剖面 C 层的 FORC 图表明,山体中部高磁性剖面磁性颗粒呈现出明显的 MD 颗粒特征(图 10),而在山底和山顶低磁性剖面存在少量的 SP 和 SD 颗粒矿物信号,信噪



说明: * 代表对应坐标轴数据使用 log₁₀ 变换得到。

图 9 吊罗山土壤化学风化参数、铁氧化物含量以及铁游离率与磁学参数关系:

- (a) 化学风化指数与磁化率;(b) 频率磁化率与磁化率;(c) 频率磁化率百分数与磁化率;(d) 频率磁化率与赤铁矿含量;
 - (e) 硅铝率与磁化率;(f) 非磁滞剩磁与磁化率;(g) 频率磁化率/非磁滞剩磁磁化率与磁化率;(h) 非磁滞剩磁与赤铁矿含量;
 - (i) 铁游离率与磁化率;(j) 饱和等温剩磁与磁化率;(k) 非磁滞剩磁/饱和等温剩磁与磁化率;(l) 饱和等温剩磁与赤铁矿含量
- Fig. 9 Relationship between pedochemical weathering parameters, iron oxide contents, Fe_d and magnetic proxies in the Diaolu Mountain:
 (a) CIA and χ_{lf} ; (b) χ_{fd} and χ_{lf} ; (c) $\chi_{fd}\%$ and χ_{lf} ; (d) χ_{fd} and Gt content; (e) Sa and χ_{lf} ; (f) ARM and χ_{lf} ; (g) χ_{fd}/χ_{ARM} and χ_{lf} ;
 (h) ARM and Gt content; (i) Fe_d/Fe_t and χ_{lf} ; (j) SIRM and χ_{lf} ; (k) ARM/SIRM and χ_{lf} ; (l) SIRM and Gt content

比较低,可能与低磁性背景下反铁磁性矿物的影响有关^[43-45]。分析 χ -T曲线发现,山体中部高磁性剖面的磁化率随增温变化相对缓和(图10e),但当山顶和山底低磁性剖面在温度接近300℃时,磁化率均出现快速增长(图10d、图10f),这可能是由反铁磁性矿物转变为磁性矿物导致^[45]。随温度继续升高,山底剖面 χ -T曲线在温度达到500℃后出现了赤铁矿的霍普金森峰(Hopkinson Peak)^[26](图10d);山中剖面(DL09)在温度达到600℃时出现磁铁矿的霍普金森峰(图10e);而山顶剖面(DL13)在温度超过600℃后呈现先急后缓的下降速率(图10f),暗示除原生磁铁矿之外有次生磁铁矿形成,可能与顶部高有机质样品加热过程对针铁矿的还原有关^[43]。

3.4 原生磁性矿物保存的气候阈值对于土壤发生与气候重建的意义

吊罗山高磁性花岗岩地区的土壤磁性富集模式与前期研究海南岛低磁性花岗岩土壤磁性的富集模式不同^[12],前者主要以原生磁性矿物的破坏为主,后者以次生磁性矿物的富集为主,但两者都表现出了类似的气候阈值控制。低磁性花岗岩地区,

土壤磁性随年均降水变化存在1500 mm左右的阈值,1500 mm以下地区,土壤磁性随降水增长而增强;1500 mm以上的地区,过多降水则导致磁性矿物的水化,磁性也快速降低,但赤铁矿与细颗粒含量有良好线性关系,说明热带地区赤铁矿与成壤磁性矿物间具有成因联系^[12]。吊罗山高磁性花岗岩区,土壤磁性在年均降水量为3278 mm的山地中部达到最高值,而在此阈值上下的山底和山顶地区,土壤磁性均随化学风化强度增加而减少,土壤磁性颗粒与赤铁矿明显脱偶甚至反相关,仅在山底相对干热地区有少量SP和SD颗粒伴随赤铁矿形成(图9d、9h和9l),这与黄土中发现的粗颗粒磁铁矿易氧化成赤铁矿的结果一致^[11]。所以,吊罗山磁性变化的阈值是控制原生磁性矿物保存的气候阈值,而不是适宜次生磁性矿物形成的气候阈值。值得注意的是,前期对海南低磁性花岗岩的研究多集中于丘陵及滨海平原地区(海拔<500 m),区域温度变化幅度相对较小(22.1℃~25.5℃)^[12],但吊罗山区温度变化幅度较大(19.8℃~25.0℃),温度联合降水的变化共同主导该气候阈值的形成。

现代土壤磁学通常把反映细颗粒磁性矿物相对

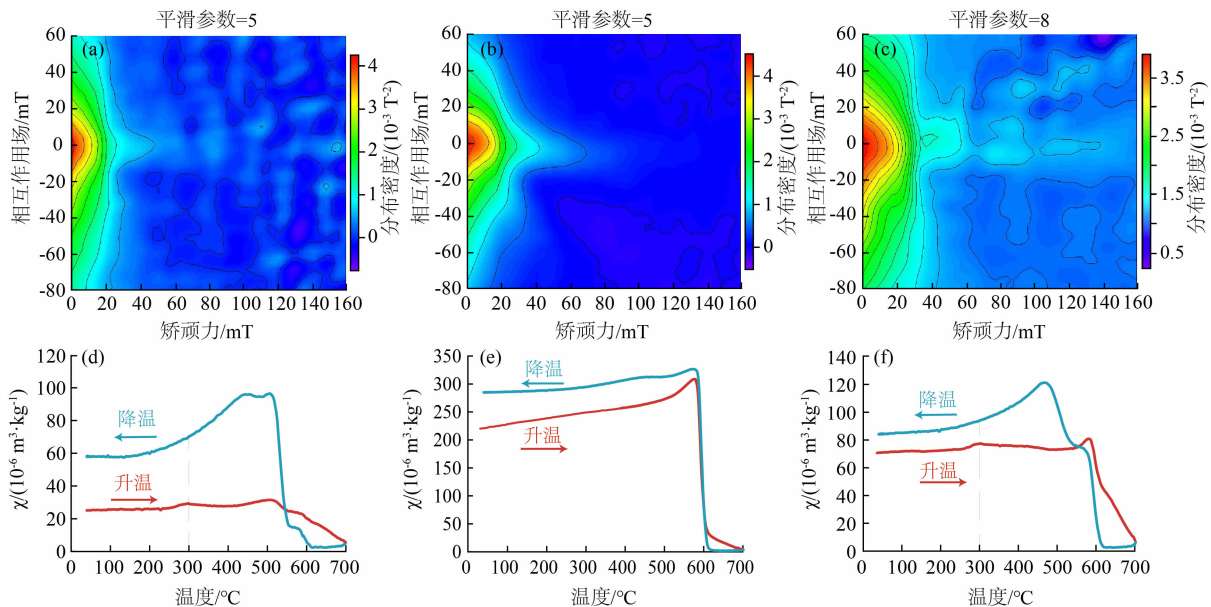


图10 吊罗山土壤样品一阶反转曲线(FORCs)和热磁(χ -T)曲线:

- (a) 山底剖面(DL01)C层一阶反转曲线;(b) 山中剖面(DL09)C层一阶反转曲线;(c) 山顶剖面(DL13)C层一阶反转曲线;
(d) 山底剖面(DL01)C层热磁曲线;(e) 山中剖面(DL09)C层热磁曲线;(f) 山顶剖面(DL13)C层热磁曲线

Fig. 10 First-order reversal curves (FORCs) and thermomagnetic (χ -T) curves of soil samples in the Diaoluo Mountain:

- (a) FORCs diagram of the mountain-base (DL01-C); (b) FORCs diagram of the mid-elevation zone (DL09-C);
(c) FORCs diagram of the mountain-summit (DL13-C); (d) χ -T curves of the mountain-base (DL01-C);
(e) χ -T curves of the mid-elevation zone (DL09-C); (f) χ -T curves of the mountain-summit (DL13-C)

含量的磁学指标作为评价化学风化、土壤发生及气候重建的重要参考^[11,16,66-67],其前提是随成壤过程进行,次生细颗粒磁性矿物均得到有效富集^[3,25,68-69]。然而,热带相对湿润地区,潮湿的土壤环境抑制了磁铁矿、磁赤铁矿等次生铁氧化物的形成,原生粗颗粒磁铁矿可能主导土壤磁性。这类原生磁性矿物在表生环境下不稳定,气候冷湿会逐渐转化为低磁性的针铁矿,而气候干热则会氧化成低磁性的赤铁矿。因此,无论是次生细颗粒磁性矿物的形成还是原生粗颗粒磁性矿物的保存,以磁铁矿和磁赤铁矿为代表的磁性矿物的富集都需要适宜的水热范围保障,这对于跟踪水热适中条件下的筒育土壤的发生过程具有重要意义。反之,对于成壤环境相对干热或冷湿的土壤亚类,磁性矿物形成和保存受限时,土壤磁性的气候指代意义可能存在不确定性。此外,以黄土-古土壤序列为代表的古气候重建多基于现代风尘沉积区的表土或残积土磁性建立气候转换方程^[12],但碎屑磁性矿物输入及水热平衡波动对于土壤及沉积物磁性矿物的气候响应会产生影响^[12,18,25-26,70],对于气候跨度大的土壤或沉积序列,可能出现原生磁性矿物保存及次生磁性矿物形成的双阈值影响,需要结合铁氧化物及化学风化等多指标综合判定其气候意义。

4 结论

为探索原生磁性矿物对多尺度土壤磁学性质及气候响应的影响,本文选取热带吊罗山高磁性花岗岩母质发育的山地土壤序列,综合运用土壤化学、土壤磁学及土壤光谱学方法,明确了热带山地气候序列铁氧化物相的多尺度分异,探讨了土壤磁性矿物的富集及气候响应机制,并得出以下结论。

(1) 区域尺度上,吊罗山中部水热适中地区的磁性矿物最为富集,磁性颗粒以原生的单畴和多畴颗粒为主,并伴随着剖面向上的磁性减弱过程。

(2) 吊罗山顶部剖面磁性明显降低,与顶部降水增加导致化学风化增强及铁氧化物的快速水化有关;山底剖面磁性明显降低,与底部温度增加导致化学风化增强及原生粗颗粒磁性矿物的快速氧化有关。

(3) 该研究表明土壤原生磁性矿物保存与土壤次生磁性矿物的形成都存在特定水热阈值,基于磁

学的大尺度土壤分类与气候重建需结合致色铁氧化物相的研究确定土壤磁性的指示意义。

致谢

感谢西南大学刘川老师、潘进疆老师对本文实验的帮助!

参考文献 (References)

- [1] SCHWERTMANN U. The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals [C]. STEWART B A. *Advances in soil science*. New York: Springer Verlag, 1985: 171-200.
- [2] CORNELL R M, SCHWERTMANN U. *The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences and uses* [M]. 2nd ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2003: 433-468.
- [3] MAHER B A. The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance [J]. *Aeolian Research*, 2011, 3(2): 87-144. DOI: 10.1016/j.aeolia.2011.01.005
- [4] MEHRA O P, JACKSON M L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2013, 7(1): 317-327. DOI: 10.1016/B978-0-08-009235-5.50026-7
- [5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12-82. [LU Rukun. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 12-82]
- [6] BALSAM W, JI Junfeng, RENOCK D, et al. Determining hematite content from NUV/Vis/NIR spectra: Limits of detection [J]. *American Mineralogist*, 2014, 99(11-22): 2280-2291. DOI: 10.2138/am-2014-4878
- [7] LU Jinmei, LONG Xiaoyong, LI Xiang, et al. Topography-dependent formation and transformation of lithogenic and pedogenic iron oxides on a volcano under a tropical monsoon climate [J]. *Catena*, 2022, 217(11): 106521. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106521
- [8] LIU Qingsong, ROBERTS A P, LARRASOANA J C, et al. Environmental magnetism: Principles and applications [J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): RG4002. DOI: 10.1029/2012RG000393
- [9] MULLINS C E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science: A review [J]. *Journal of Soil Science*, 1977, 28(2): 223-246. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1977.tb02232.x
- [10] 卢升高, 董瑞斌, 俞劲炎. 中国东部红土的磁性及其环境意义 [J]. *地球物理学报*, 1999, 42(6): 764-771. [LU Shengao, DONG Ruibin, YU Jinyan. Magnetic measurement characterization of red earth profile in eastern China and its environmental implications [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(6):

- 764–771] DOI: 10.3321/j.issn:0001–5733.1999.06.006
- [11] LIU Qingsong, SUN Youbin, QIANG Xiaoke, et al. Characterizing magnetic mineral assemblages of surface sediments from major Asian dust sources and implications for the Chinese loess magnetism [C]. *Earth, Planets and Space*, 2015, **67**(1): 61. DOI: 10.1186/s40623–015–0237–8
- [12] LONG Xiaoyong, JI Junfeng, BARRÓN V, et al. Climatic thresholds for pedogenic iron oxides under aerobic conditions: Processes and their significance in paleoclimate reconstruction [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, **150**(11): 264–277. DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.08.031
- [13] ZAN Jinbo, FANG Xiaomin, KANG Jian, et al. Spatial and altitudinal variations in the magnetic properties of eolian deposits in the northern Tibetan Plateau and its adjacent regions: Implications for delineating the climatic boundary [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, **208**(11): 103271. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103271
- [14] MENG Xianqiang, LI G K, LIU Lianwen, et al. Decoupled paleosol-based proxies in Chinese loess deposits: Role of leaching and illuviation processes [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, **298**: 107847. DOI: 10.1016/J.QUASCIREV.2022.107847
- [15] HAN Jiamao, LYU Houyuan, WU Naiqin, et al. The magnetic susceptibility of modern soils in China and its use for paleoclimate reconstruction [J]. *Studia Geophys et Geodaetica*, 1996, **40**(7): 262–275. DOI: 10.1007/BF02300742
- [16] 周文娟, 杨小强, 周永章, 等. 广东小良水土保持观察站花岗岩风化壳磁化率特征及其与生态环境演替的关系[J]. *古地理学报*, 2007, **9**(1): 77–86. [ZHOU Wenjuan, YANG Xiaoqiang, ZHOU Yongzhang, et al. Characteristics of magnetic susceptibility of granite weathering crust and their relationship with succession of ecologic environments in Xiaoliang Soil and Water Conservation Station, Guangdong Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, **9**(1): 77–86]
- [17] MAHER B A, ALEKSEEV A, ALEKSEEVA T. Variation of soil magnetism across the Russian steppe: Its significance for use of soil magnetism as a palaeorainfall proxy [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, **21**(14–15): 1571–1576. DOI: 10.1016/S0277–3791(02)00022–7
- [18] BALSAM W, JI Junfeng, CHEN Jun. Climatic interpretation of the Luoquan and Lingtai loess sections, China, based on changing iron oxide mineralogy and magnetic susceptibility [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, **223**(3–4): 335–348. DOI: 10.1016/j.epsl.2004.04.023
- [19] NIE Junsheng, STEVENS T, SONG Yougui, et al. Pacific freshening drives Pliocene cooling and Asian monsoon intensification [J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**(1): 5474. DOI: 10.1038/srep05474
- [20] 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 中国黄土环境磁学[J]. *第四纪研究*, 2007, **27**(2): 193–209. [DENG Chenglong, LIU Qingsong, PAN Yongxin, et al. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(2): 193–209] DOI: 10.3321/j.issn:1001–7410.2007.02.005
- [21] MAHER B A, MUTCH T J, CUNNINGHAM D. Magnetic and geochemical characteristics of Gobi Desert surface sediments: Implications for provenance of the Chinese Loess Plateau [J]. *Geology*, 2009, **37**(3): 279–282. DOI: 10.1130/G25293A.1
- [22] ZHAO Wancang, SUN Youbin, BALSAM W, et al. Hf-Nd isotopic variability in mineral dust from Chinese and Mongolian deserts: Implications for sources and dispersal [J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**(1): 6519–6554. DOI: 10.1038/srep05837
- [23] 叶玮. 新疆西风区黄土与古土壤磁化率变化特点[J]. *中国沙漠*, 2001, **21**(4): 380–386. [YE Wei. Study on magnetic susceptibility of loess and paleosol sequences in westerly region of Xinjiang [J]. *Journal of Desert Research*, 2001, **21**(4): 380–386] DOI: 1000–694X 200104–0380–07
- [24] LU Shenggao, XUE Qingfeng, ZHU Lei, et al. Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China [J]. *Catena*, 2007, **73**(1): 23–33. DOI: 10.1016/j.catena.2007.08.004
- [25] LONG Xiaoyong, JI Junfeng, BALSAM W. Rainfall-dependent transformations of iron oxides in a tropical saprolite transect of Hainan Island, South China: Spectral and magnetic measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(3): F03015. DOI: 10.1029/2010JF001712
- [26] HUANG Ran, LONG Xiaoyong, ZHANG Yue, et al. A dual mechanism drives the enrichment of pedogenic magnetic particles derived from red beds [J]. *Catena*, 2024, **246**(10): 108421. DOI: 10.1016/j.catena.2024.108421
- [27] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, **23**(6): 1217–1238. [WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, **23**(6): 1217–1238] DOI: 1000–0364(2007)023(06)–1217–38
- [28] GUO Shanglong, CAI Yunfeng, REN Juan, et al. Formation and migration of magnetic particles associated with iron oxide transformation at a hillslope scale [J]. *Catena*, 2021, **197**(2): 104944. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104944
- [29] ZHANG Yao, WANG Hongya, FENG Siwen, et al. Mineral magnetism potentially indicating degrees of soil gleization and their implications for tracing sediment sources: Inferences for a small catchment on Guizhou Plateau, SW China [J]. *Catena*, 2021, **201**(6): 105183. DOI: 10.1016/J.CATENA.2021.105183
- [30] ZHANG Xinming, LONG Xiaoyong, XIONG Chunlin, et al. The origin and nature of magnetic particles from soils and sediments constrained by hydrodynamics and geochemistry around a tropical lagoon system [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2024, **129**(9): e2024JC020913. DOI: 10.1029/2024JC020913

- [31] 魏昌欣, 李孙雄, 云平, 等. 海南吊罗山一带 1:5 万区调主要成果与进展[J]. 华南地质与矿产, 2011, **27**(4): 335 - 341. [WEI Changxin, LI Sunxiong, YUN Ping, et al. New progresses in 1:50000 regional geological survey of Diaoluoshan area, southeastern Hainan Island [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2011, **27**(4): 335 - 341]
- [32] 李孙雄, 魏昌欣, 王艳红, 等. 海南岛东南部吊罗山地区中深变质岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2016, **40**(4): 798 - 807. [LI Sunxiong, WEI Changxin, WANG Yanhong, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and its geological implications of the middle-high grade metamorphic rocks in the Diaoluoshan area, southeastern Hainan Island [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, **40**(4): 798 - 807] DOI: 10.16539/j.dgzycx.2016.04.013
- [33] 邱治军, 邱坚锐, 周光益, 等. 海南吊罗山与尖峰岭热带林区气象要素对比研究[J]. 生态科学, 2004, **23**(4): 338 - 341. [QIU Zhijun, QIU Jianrui, ZHOU Guangyi, et al. Comparative analysis of meteorological elements between Hainan's Diaoluoshan and Jianfengling tropical forest region [J]. *Ecologic Science*, 2004, **23**(4): 338 - 341] DOI: 1008-8873(2004)04-338-04
- [34] 李晨笛, 梁宜文, 杨小波, 等. 吊罗山热带天然林物种多样性的海拔分布格局[J]. 广西植物, 2023, **43**(5): 912 - 922. [LI Chendi, LIANG Yiwen, YANG Xiaobo, et al. Altitude distribution pattern of species diversity in tropical natural forest in Diaoluo Mountain [J]. *Guihaia*, 2023, **43**(5): 912 - 922] DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202201056
- [35] 王颖. 海南岛海岸环境特征[J]. 海洋地质动态, 2002, **18**(3): 1 - 9. [WANG Ying. Features of Hainan Island coastal environment [J]. *Marine Geology Letters*, 2002, **18**(3): 1 - 9] DOI: 1009-2722(2002)03-0001-09
- [36] 赵玉国, 张甘霖, 龚子同, 等. 海南岛不同地质背景下的土壤类型、质量特征和作物适宜性[J]. 第四纪研究, 2005, **25**(3): 389 - 395. [ZHAO Yuguo, ZHANG Ganlin, GONG Zitong, et al. Soil type, soil quality and crop suitability of soils developed from different geology environments in Hainan Island [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, **25**(3): 389 - 395] DOI: 10.3321/j.issn:1001-7410.2005.03.016
- [37] 杜国华, 张甘霖, 龚子同. 土种与土系参比的初步探讨—以海南岛土壤为例[J]. 土壤, 2004, **36**(3): 298 - 302. [DU Guohua, ZHANG Ganlin, GONG Zitong. Correlation of soil species and soil series; A case study of the soils of Hainan Island [J]. *Soils*, 2004, **36**(3): 298 - 302] DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2004.03.013
- [38] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, **299**(10): 715 - 717. DOI: 10.1038/299715a0
- [39] BARRON V, TORRENT J. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron-oxides on soil colour [J]. *Journal of Soil Science*, 1986, **37**(4): 499 - 510. DOI: 10.1111/j.1365 - 2389.1986.tb00382.x
- [40] TORRENT J, LIU Qingsong, BLOEMENDAL J, et al. Magnetic enhancement and Iron Oxides in the upper Luochuan Loess-Paleosol sequence, Chinese Loess Plateau [J]. *Soil Science Society*, 2007, **71**(5): 1570 - 1578. DOI: 10.2136/sssaj2006.0328
- [41] DEARING J A, DANN R J L, HAY K, et al. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials [J]. *Geophysical Journal International*, 1996, **124**(1): 228 - 240. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb06366.x
- [42] DUNLOP D, OZDEMIR O, FULLER M D. Rock magnetism: Fundamentals and frontiers [J]. *Physics Today*, 2008, **51**(9): 64. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb06366.x
- [43] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义[J]. 地球物理学报, 2009, **52**(4): 1041 - 1048. [LIU Qingsong, DENG Chenglong. Magnetic susceptibility and its environmental significances [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, **52**(4): 1041 - 1048] DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.021
- [44] 刘青松, 邓成龙, 潘永信. 磁铁矿和磁赤铁矿磁化率的温度和频率特性及其环境磁学意义[J]. 第四纪研究, 2007, **27**(6): 955 - 962. [LIU Qingsong, DENG Chenglong, PAN Yongxin. Temperature-dependency and frequency-dependency of magnetic susceptibility of magnetite and maghemite and their significance for environmental magnetism [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(6): 955 - 962] DOI: 10.3321/j.issn:1001-7410.2007.06.010
- [45] ROBERTS A P, PIKE C R, VEROSUB K L. First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(B12): 28461 - 28475. DOI: 10.1029/2000JB900326
- [46] OHTA T, ARAI H. Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering [J]. *Chemical Geology*, 2007, **240**(3): 280 - 297. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2007.02.017
- [47] LIU Wenjing, LIU Congqiang, BRANTLEY S L, et al. Deep weathering along a granite ridgeline in a subtropical climate [J]. *Chemical Geology*, 2016, **427**(4): 17 - 34. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.02.014
- [48] BRANTLEY S L, SHAUGHNESSY A, LEBEDEVA M I, et al. How temperature-dependent silicate weathering acts as Earth's geological thermostat [J]. *Science*, 2023, **379**(6630): 382 - 389. DOI: 10.1126/SCIENCE.ADD2922
- [49] BRAGA M A S, PAQUET H, BEGONHA A. Weathering of granites in a temperate climate (NW Portugal): Granitic saprolites and arenization [J]. *Catena*, 2002, **49**(1-2): 41 - 56. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00017-6
- [50] DUPRE B, DESSERT C, OLIVA P, et al. Rivers, chemical weathering and Earth's climate [J]. *Comptes Rendus Geoscience*,

- 2003, **335**(16): 1141 – 1160. DOI: 10.1016/j.crte.2003.09.015
- [51] DIXON J L, HEIMSATH A M, KASTE J, et al. Climate-driven processes of hillslope weathering [J]. *Geology*, 2009, **37**(11): 975 – 978. DOI: 10.1130/G30045A.1
- [52] 杨石岭, 丁仲礼. 7.0 Ma 以来中国北方风尘沉积的游离铁/全铁值变化及其古季风指示意义 [J]. *科学通报*, 2000, **45**(22): 2453 – 2456. [YANG Shiling, DING Zhongli. Variations in the ratio of free iron to total iron in aeolian sediments in northern China since 7.0 Ma and their palaeomonsoon implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(22): 2453 – 2456]
- [53] KUMP L R, BRANTLEY S L, ARTHUR M A. Chemical weathering, atmospheric CO₂, and climate [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, **28**(1): 611 – 667. DOI: 10.1146/annurev.earth.28.1.611
- [54] BHATTACHARYYA T, PAL D K, SRIVASTAVA P. Formation of gibbsite in the presence of 2:1 minerals: An example from Ultisols of northeast India [J]. *Clay Minerals*, 2000, **35**(5): 827 – 840. DOI: 10.1180/000985500547269
- [55] CABELLO E, MORALES M P, SERNA C J, et al. Magnetic enhancement during the crystallization of ferrihydrite at 25 and 50 °C [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2009, **57**(1): 46 – 53. DOI: 10.1346/CCMN.2009.0570105
- [56] FRITSCH E, MORIN G, BEDIDI A, et al. Transformation of haematite and Al-poor goethite to Al-rich goethite and associated yellowing in a ferralitic clay soil profile of the middle Amazon Basin (Manaus, Brazil) [J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, **56**(5): 575 – 588. DOI: 10.1038/232624a0
- [57] SCHWERTMANN U. Transformation of hematite to goethite in soils [J]. *Nature*, 1971, **232**(5313): 624 – 625. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2005.00693.x
- [58] JI Junfeng, CHEN Jun, BALSAM W, et al. High resolution hematite/goethite records from Chinese loess sequences for the last glacial-interglacial cycle: Rapid climatic response of the East Asian Monsoon to the tropical Pacific [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(17): L03207. DOI: 10.1029/2003GL018975
- [59] 胡雪峰, 朱煜, 沈铭能. 南方网纹红土多元成因的粒度证据 [J]. *科学通报*, 2005, **50**(9): 918 – 925. [HU Xuefeng, ZHU Yu, SHEN Mingneng. Grain-size evidence for the multiple causes of southern reticulated red earth [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(9): 918 – 925] DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2005.09.014
- [60] 张甘霖, 龚子同. 水耕人为土某些氧化还原形态特征的微结构和形成机理 [J]. *土壤学报*, 2001, **38**(1): 10 – 16. [ZHANG Ganlin, GONG Zitong. Micro-structure and formation mechanism of typical redoxi-orphic features of hydric anthrosols [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, **38**(1): 10 – 16] DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2001.01.002
- [61] 徐琪, 陈志诚. 鳝血土形成的条件及其在土壤改良上的意义 [J]. *土壤通报*, 1961, **4**(4): 43 – 49. [XU Qi, CHEN Zhicheng. Conditions for the formation of earthworm blood soil and its significance in soil improvement [J]. *Soil Bulletin*, 1961, **4**(4): 43 – 49] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.1961.04.009
- [62] BARRN V, TORRENT J. Evidence for a simple pathway to maghemite in Earth and Mars soils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, **66**(15): 2801 – 2806. DOI: 10.1016/S0016-7037(02)00876-1
- [63] NAVROTSKY A, MAZEINA L, MAJZLAN J. Size-driven structural and thermodynamic complexity in iron oxides [J]. *Science*, 2008, **319**(5870): 1635 – 1638. DOI: 10.1126/science.1148614
- [64] REN Juan, LONG Xiaoyong, JI Junfeng, et al. Different enrichment patterns of magnetic particles modulated by primary iron-phosphorous input [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(22): e2020GL090439. DOI: 10.1029/2020GL090439
- [65] CAI Y F, LONG X Y, MENG X Q, et al. Coordinated and competitive formation of soil magnetic particles driven by contrary climate development [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(16): e2021GL094506. DOI: 10.1029/2021GL094506
- [66] MAHER B A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: Paleoclimatic implications [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, **137**(1): 25 – 54. DOI: 10.1016/S0031-0182(97)00103-X
- [67] ZAN Jinbo, KANG Jian, YAN Maodu, et al. A pedogenic model for the magnetic enhancement of late Miocene fluvial-lacustrine sediments from the Xining Basin, NE Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, **123**(8): 6176 – 6194. DOI: 10.1029/2018JB016064
- [68] 赵嘉雯, 王龙升, 张玉柱, 等. 若尔盖盆地黄河牛轭湖古河道沉积物磁学特征及其古环境意义 [J]. *地理学报*, 2025, **80**(1): 167 – 182. [ZHAO Jiawen, WANG Longsheng, ZHANG Yuzhu, et al. Magnetic characteristics of paleochannel sediments of the Yellow River in the Zoige basin and their paleoenvironmental significance [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2025, **80**(1): 167 – 182] DOI: 10.11821/dlx202501011
- [69] 梁潇, 杨萍果, 姚娇, 等. 16 ka 以来黄土高原东亚夏季季风变化的环境磁学记录 [J]. *地理学报*, 2021, **76**(3): 539 – 549. [LIANG Xiao, YANG Pingguo, YAO Jiao, et al. Environmental magnetic record of East Asian summer monsoon variability on the Chinese Loess Plateau since 16 ka BP [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(3): 539 – 549] DOI: 10.11821/dlx202103004
- [70] ZHANG Weiguo, YU Lizhong, LU Min, et al. Magnetic properties and geochemistry of the Xiashu Loess in the present subtropical area of China, and their implications for pedogenic intensity [J]. *Earth and Planet Science Letter*, 2007, **260**(1): 86 – 97. DOI: 10.1016/j.epsl.2007.05.018

Climate Response of Soil Magnetism in Tropical High-Magnetic Granite Area of China and Its Paleoclimatic Significance

LI Su, LONG Xiaoyong*, HUANG Ran, HAO Dingfan, BAI Ying

(School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Pedogenic iron oxides are highly sensitive to regional climate and pedogenic environment variations, and their magnetic proxies have been widely applied in soil classification and paleoclimate reconstruction. The weathering and alteration of magnetic minerals associated with granite distort the climatic response of soil magnetism; however, previous research predominantly focused on low-magnetic granite regions, leaving the climatic response of soil magnetism in high-magnetic granite areas understudied.

This study investigated high-magnetic granite residual soils in the Diaoluo Mountain, Hainan Island, China, employing pedochemical and magnetic methods to analyze the transformation processes of iron oxide phases and the climatic response mechanisms of magnetic particles under varying montane climatic conditions (temperature ranging in 25.0 °C ~ 19.8 °C, precipitation varying from 2012 ~ 3832 mm · a⁻¹).

(1) It was found that the magnetism of granite residual soils in the Diaoluo Mountain exhibited a threshold effect in response to climate change as compared with ones in low-magnetic granite regions.

(2) Magnetic minerals were most enriched in the mid-elevation zone with moderate climate (at a temperature of 21.4 °C and 3278 mm in precipitation), where magnetic particles were dominated by primary single-domain (SD) and multi-domain (MD) grains that increased with soil profile depth.

(3) Magnetism decreased significantly at both the summit and base of the mountain. The reduced magnetism at the summit was attributed to enhanced chemical weathering and rapid hydration of iron oxides caused by increased precipitation, whereas the decline at the base was associated with elevated temperatures that intensified chemical weathering and accelerated oxidation of primary coarse-grained magnetic minerals.

This research provides crucial insights into pedogenic processes in high-magnetic parent materials and facilitates evaluation of how the degradation of detrital magnetic minerals affects climate reconstruction in sedimentary archives.

Key words: granite; iron oxides; magnetic minerals; tropics

(责任编辑 朱颖彦 李 嵘)